

Dinamika pengendapan lahar permukaan pada alur-alur lembah di bagian selatan Gunung Api Merapi, Yogyakarta

SRI MULYANINGSIH¹, SAMPURNO², YAHDI ZAIM², DENY JUANDA PURADIMAJA²,
dan SUTIKNO BRONTO³

¹Teknik Geologi IST AKPRIND, Jln. Kalisahak No. 28 Yogyakarta, Indonesia

²Teknik Geologi ITB, Jln. Ganesha No. 10 Bandung, Indonesia

³Pusat Survei Geologi, Jln. Diponegoro No. 57 Bandung, Indonesia

ABSTRACT

Endapan aliran rombakan Gunung Api Merapi, yang lebih dikenal sebagai lahar, terbentuk dari hasil longsoran endapan awan panas yang dipicu oleh curah hujan yang sangat tinggi. Pada saat ini, endapan awan panas tersebut berasal dari guguran kubah lava. Material suspensi tersebut selanjutnya menuruni lereng dengan kecepatan yang tinggi, menghasilkan aliran turbulen. Aliran tersebut biasanya berkembang pada daerah dengan perbedaan morfologi berkemiringan lereng tinggi ke landai, atau yang sering dikenal sebagai daerah tekuk lereng. Studi ini didasarkan pada pengamatan dan pengukuran fragmen lahar yang berukuran besar di permukaan. Analisis meliputi arah penyirapan, bentuk, dan besar butir fragmen. Hasil penelitian mendapatkan model arah aliran fragmen besar lahar dari bagian atas aliran rombakan, yang membentuk “model punggung katak” atau “model punggung gajah”. Bagian depan katak atau gajah (kepala) yaitu arah aliran atau bagian depan aliran. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa model tersebut berlaku pada fragmen dengan diameter 90 cm atau lebih besar. Di daerah penelitian, fragmen dengan diameter 90 cm mencapai jarak hingga 22 km dari sumbernya. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai model untuk menentukan arah aliran lahar (aliran rombakan) purba yang sumbernya belum diketahui.

Kata kunci: lahar, fragmen, penyirapan, model, aliran

SARI

The Merapi Volcanic debris flow, which is familiarly known as lahar, is formed from pyroclastic deposits that is slid by high rain water. Now, the pyroclastic deposits are produced from a collapsing lava dome. The suspension flows downhill in a high speed, to produce a turbulent flow. That flow are usually developed within areas of a different morphology having high to lower slope gradient, known as a slope fold of a foot hill. The study is based on the measurement and identification of large fragments of the surface deposits. Analysis includes imbrication direction, grain shape, and grain size of the fragments. The result of the study shows the model of a flow direction of large fragments of upper part of debris that form “frog back model” or “elephant back model”. The head of the frog or elephant explains the flow direction. The result of the research confirms that the model is valid for fragments having a range size of diameter of 90 cm or larger. In the studied area, the fragment of 90 cm in diameter has reached a distance up to 22 km from the source. Therefore the result of this research is able to be used as a model in determining the paleo-debris flows of unknown source.

Keywords: lahar, fragment, imbrication, model, flow

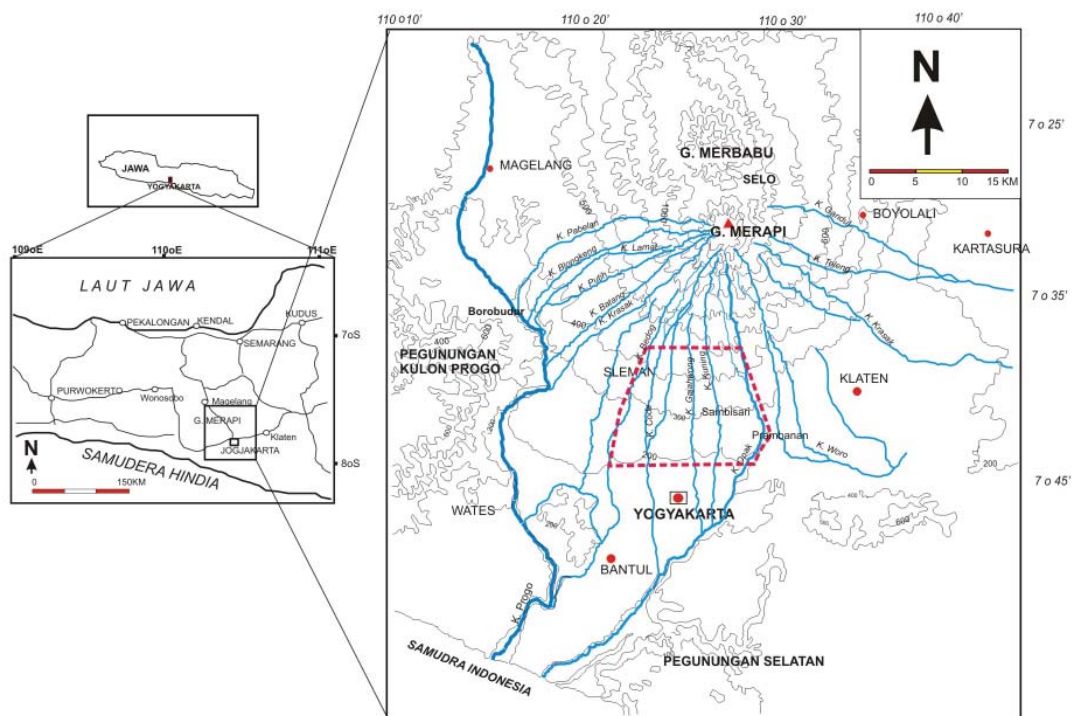
PENDAHULUAN

Dataran sisi selatan Gunung Api Merapi diketahui sebagai daerah aliran bahan klastika gunung api, baik piroklastika maupun lahar. Didasarkan atas analisis umur ^{14}C terhadap material-material tersebut, diketahui bahwa lahar mengalir melalui lembah-lembah Sungai Woro, Gendol, Opak, Kuning, Boyong, dan Krasak dalam beberapa periode, antara lain pada 740 tl, 360 tl, 240 tl, dan tahun 1828. Kini, di permukaan wilayah-wilayah tersebut masih tersingkap bongkah-bongkah lahar tahun 1930 dan 1969.

Studi ini bertujuan untuk mengetahui model pengendapan material lahar tersebut, sehingga dapat diketahui model alirannya, serta data petunjuk (kunci) yang dapat digunakan untuk mengetahui dinamika pengendapannya. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan sebagai model untuk menentukan arah aliran material (sedimen) rombakan dengan fragmen bongkah yang belum diketahui sumbernya, misalnya pada gunung api tua dan batuan gunung api berumur Tersier dan Kuartar yang telah tererosi lanjut.

Metode penelitian diawali dengan pengambilan data primer di lapangan, yaitu pengukuran fragmen bongkah (lebih besar dari 50 cm) yang meliputi ukuran butir, arah sumbu penyirapan, dan bentuk butir. Data primer tersebut selanjutnya dianalisis secara statistika, meliputi pemilahan fragmen berdasarkan bentuk dan besar butir, serta arah penyirapan, yang disajikan dalam bentuk diagram *rose* dan grafik. Morfologi dan bentuk butir fragmen dianalisis langsung di lapangan saat pengukuran. Tujuan penelitian adalah untuk membuktikan keberlakuan sifat *fining up*, *rounding up*, dan *sorting up* setiap butiran fragmen lahar. Konsep terdahulu menyebutkan bahwa makin ke hilir, ukuran butir semakin halus, membulat dan terpilah; arah sumbu panjang fragmen diyakini sebagai arah penyirapan; dan penyirapan hanya berlaku untuk aliran-aliran dengan arus laminar-traksi.

Daerah penelitian terletak di bagian selatan dataran-kaki Gunung Api Merapi (Gambar 1). Alasan pemilihan lokasi daerah penelitian adalah telah diketahuinya sumber material awan panasnya, yaitu dari Gunung Api Merapi di utara.



Gambar 1. Peta lokasi dan situasi daerah penelitian (dalam garis putus-putus merah) terhadap Gunung Api Merapi.

DASAR TEORI

Menurut Costa (1984) dan Fisher & Schmincke (1984), lahar merupakan aliran rombakan larutan suspensi kaya partikel yang berdensitas tinggi. Regangan aliran dihasilkan dari interaksi partikel-partikel berkonsentrasi tinggi. Pada konsentrasi kurang dari 20% atau 30%, partikel mengambang dalam campuran padatan-air sebagai turbulen, dan pada konsentrasi hingga 60% interaksi partikelnya termodifikasi sebagai kombinasi turbulen dan interaksi partikel. Konsentrasi partikel yang lebih tinggi lagi, didominasi oleh interaksi partikel hingga dapat menjadi aliran plastis.

Menurut Lowe (1982), ada dua gaya pembentuk ketahanan aliran, yaitu:

(1) gaya-gaya elektrostatis yang menyebabkan resistensi kohesif aliran (*cohesive resistance to flow*) yang dibentuk oleh campuran lumpur-air, atau

(2) tegangan friksi yang disebabkan oleh interaksi inersia antarfragmen besar (lebih besar dari lanau), yang menyebabkan *inertial resistance to flow* atau resistensi friksional (takkohesif atau aliran densiti termodifikasi).

Kedua hal tersebut dapat terbentuk bergantung pada limpahan material halus (lempungan), pada limpahan yang kecil (~5%) dapat menyebabkan perubahan perilaku aliran secara besar-besaran. Dalam aliran rombakan, butiran digerakkan oleh efek konsentrasi tinggi aliran massa (ct. regangan kohesif, regangan friksi, ketahanan kekentalan, dan tekanan pengurai aliran), oleh turbulensi, dan pengosongan paksa fluida dari rongga antar butir.

Aliran rombakan sendiri terdiri atas: (1) fase menerus (fase matrik atau fluida) yang tersusun oleh campuran air dan partikel dengan diameter <2 mm, dan (2) fase butiran kasar berdiameter >2 mm (Fisher, 1971 dan 1983; Scott, 1988). Dengan demikian, walaupun ukuran butirnya menerus dari lempung ke bongkah, namun secara konseptual selalu mempertimbangkan sifat-sifat konsentrasinya yang tinggi (ct. kekentalan, densitas, dan regangan aliran). Aliran rombakan berpartikel besar memang dapat dikenali dari parameter ukuran butir fase matriknya, namun keberadaan matrik dapat lebih mudah dikenali dari ukuran fragmen terbesar (ct. rata-rata ukuran butir dari kelima fragmen terbesar dalam suatu area tertentu).

Selama pergerakannya menuruni lereng yang

berair (sungai), lahar secara progresif bercampur dengan air, sehingga alirannya menjadi hiperkonsentrasi. Aliran tersebut menyerap regangan dan kohesi lahar, dengan tetap membawa sedimen dalam jumlah yang besar. Dalam hal ini fragmen-fragmen berperan sebagai penggerak turbulensi akibat interaksi antar partikel (Pierson dan Scott, 1985; Scott, 1988; Smith, 1986). Oleh besarnya regangan dan beban yang dimiliki, lahar mampu mempengaruhi sistem sungai, yaitu morfologi (ketinggian, lebar, dan kedalaman lembah), tatanan (pembentukan alur sungai, dataran limpah banjir, tanggul, dan teras sungai baru) dan arah aliran sungai secara lokal (Fisher, 1984; Scott, 1988).

HASIL PENELITIAN

Pengukuran butir fragmen besar (diameter lebih dari 90 cm), penentuan lima fragmen terbesar, dan diameter rata-rata, serta arah penyirapan fragmen telah dilakukan di daerah pada ketinggian antara 130-350 m dpl, mulai dari Sungai Opak-Gendol hingga Sungai Winongo. Dari hasil pengukuran diketahui bahwa fragmen terbesar dijumpai pada ketinggian antara 300-350 m dpl di Cokrosari (Tabel 1-13).

Dari hasil pengamatan pada fragmen bongkah lahar di lapangan, berhasil diketahui bahwa kebanyakan fragmen bongkah tersebut, baik yang tersingkap secara individu maupun berkelompok, memperlihatkan morfologi yang bentuknya menyerupai “punggung katak saat berhenti” (Gambar 2). Morfologi yang menyerupai “punggung katak saat berhenti” tersebut dalam jumlah yang banyak membentuk alur penyirapan. Orientasi penyirapan diinterpretasikan sebagai arah aliran saat pengendapan dan arah sebaran (distribusi fragmen). Arah distribusi butiran terbentuk oleh gaya resistensi interaksi antar butiran di bagian permukaan aliran massa tersebut.

Pada fragmen yang lebih besar (\varnothing butir lebih besar dari 4 m), bentuk-bentuk morfologi yang menyerupai “punggung katak” tersebut kurang berkembang dengan baik, namun lebih menyerupai bentuk “tempurung kura-kura” (Gambar 3). Selain penampakan bentuk punggung katak dan tempurung kura-kura, kebanyakan fragmen yang belum pernah ditambang/digali memperlihatkan “susunan

Tabel 1. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Winongo dan Sungai Bedog Dusun Plosorejo-Wonosobo-Selorejo (275-325 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	200	15	Meruncing
2	170	330	Meruncing
3	310	45	Membulat tanggung
4	150	33	Membulat tanggung
5	200	25	Membulat tanggung
6	230	40	Membulat tanggung
7	237	37	Meruncing tanggung
8	196	70	Meruncing
9	335	30	Meruncing
10	270	20	Meruncing tanggung
11	310	320	Meruncing tanggung
12	150	40	Meruncing
13	150	30	Meruncing
14	195	350	Membulat tanggung
15	250	340	Membulat tanggung
16	173	25	Meruncing
17	188	30	Membulat tanggung
18	200	40	Membulat tanggung
19	150	350	Meruncing
20	116	10	Membulat tanggung
21	190	20	Membulat tanggung
22	370	320	Membulat tanggung
23	290	350	Membulat
24	170	70	Meruncing tanggung
25	180	-	Membulat
26	200	30	Membulat tanggung
27	190	60	Membulat tanggung
28	160	50	Membulat tanggung
29	150	45	Meruncing tanggung
30	425	32	Meruncing
31	225	60	Meruncing tanggung
32	425	60	Membulat tanggung
33	206	53	Membulat
34	230	40	Membulat tanggung
35	250	40	Membulat tanggung
36	160	310	Membulat tanggung
37	180	330	Membulat
38	240	340	Membulat tanggung
39	150	0	Meruncing
40	157	25	Membulat tanggung
41	177	20	Membulat tanggung
42	240	330	Membulat
43	340	30	Meruncing tanggung
44	180	350	Membulat
45	236	20	Membulat
46	224	5	Meruncing
47	408	0	Membulat
48	160	10	Meruncing
49	180	10	Meruncing
50	170	300	Meruncing
51	200	340	Membulat tanggung
52	155	357	Membulat tanggung
53	244	25	Membulat tanggung
54	180	340	Membulat tanggung
55	207	350	Membulat tanggung
56	190	335	Membulat
57	170	25	Membulat tanggung
58	360	35	Membulat
59	310	10	Membulat tanggung
60	257	30	Meruncing
61	280	340	Meruncing
62	300	320	Membulat
63	210	10	Membulat
64	257	320	Membulat
65	413	320	Membulat tanggung
66	250	45	Membulat tanggung
67	250	20	Membulat
68	240	25	Membulat

Tabel 2. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Winongo dan Sungai Boyong, Dusun Rejodani (275-320 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	257	75	Membulat
2	277	60	Meruncing
3	340	40	Meruncing
4	160	45	Meruncing
5	174	65	Membulat
6	180	65	Meruncing tanggung
7	155	60	Meruncing
8	290	70	Membulat
9	220	70	Membulat tanggung
10	210	55	Meruncing
11	290	340	Membulat
12	160	60	Membulat
13	150	40	Meruncing
14	160	40	Membulat
15	230	50	Membulat
16	257	0	Meruncing tanggung
17	218	80	Membulat
18	197	60	Membulat
19	280	330	Membulat
20	317	55	Membulat
21	194	60	Membulat
22	173	40	Membulat
23	170	20	Membulat
24	230	340	Membulat
25	225	330	Membulat
26	157	350	Membulat
27	260	340	Meruncing
28	230	350	Membulat
29	150	330	Membulat
30	160	30	Membulat
31	190	0	Meruncing
32	170	340	Meruncing tanggung
33	255	5	Membulat tanggung
34	310	0	Membulat
35	155	355	Membulat
36	160	0	Meruncing
37	250	25	Membulat
38	180	35	Meruncing tanggung
39	240	40	Membulat
40	160	30	Meruncing
41	320	0	Membulat
42	170	30	Membulat
43	160	40	Meruncing
44	187	50	Membulat
45	250	340	Membulat
46	177	0	Membulat
47	230	20	Meruncing tanggung
48	305	340	Membulat
49	265	70	Membulat tanggung
50	190	20	Membulat
51	225	0	Membulat tanggung
52	230	330	Meruncing
53	180	330	Meruncing
54	320	40	Meruncing
55	230	5	Membulat tanggung
56	245	45	Membulat
57	220	350	Meruncing
58	330	0	Meruncing
59	220	30	Membulat
60	200	20	Membulat
61	245	320	Meruncing
62	235	355	Meruncing
63	260	340	Meruncing tanggung
64	260	320	Meruncing
65	290	330	Meruncing tanggung
66	170	0	Membulat tanggung
67	180	0	Membulat
68	210	350	Membulat
69	170	335	Membulat
70	235	330	Membulat
71	220	340	Membulat tanggung
72	210	345	Meruncing tanggung
73	160	25	Membulat
74	210	350	Membulat
75	190	320	Membulat tanggung
76	150	330	Meruncing
77	180	330	Membulat
78	200	80	Meruncing tanggung
79	170	20	Membulat
80	160	40	Membulat
81	430	340	Meruncing tanggung
82	338	0	Membulat

Tabel 3. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Winongo dan Sungai Boyong, Dusun Mudal (150-200 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	192	55	Meruncing tanggung
2	140	30	Meruncing tanggung
3	120	40	Membulat tanggung
4	200	65	Meruncing
5	160	20	Meruncing
6	180	40	Membulat
7	145	40	Membulat tanggung
8	180	30	Membulat
9	150	25	Meruncing
10	140	35	Membulat
11	140	50	Membulat
12	150	40	Membulat
13	120	35	Membulat
14	120	20	Membulat
15	125	340	Membulat
16	130	35	Membulat tanggung
17	195		Meruncing
18	180	25	Membulat
19	165	0	Membulat tanggung
20	120	25	Meruncing tanggung
21	165	45	Membulat tanggung
22	150	20	Membulat
23	130	30	Membulat
24	120	40	Meruncing
25	150	40	Meruncing
26	130	20	Meruncing tanggung
27	130	20	Membulat
28	150	20	Meruncing tanggung
29	123	40	Membulat
30	150	35	Membulat
31	150	40	Membulat
32	325	35	Membulat tanggung

Tabel 4. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Boyong dan Sungai Pelang, Dusun Ngasem-Ngebel Gede (175-200 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	160	0	Meruncing
2	380	330	Membulat tanggung
3	180	25	Meruncing
4	380	340	Meruncing
5	250	330	Meruncing
6	140	55	Meruncing tanggung
7	180	45	Membulat tanggung
8	245	35	Meruncing tanggung
9	160	335	Membulat
10	178	320	Membulat tanggung
11	255	340	Meruncing
12	120	300	Meruncing
13	245	310	Meruncing
14	230	35	Membulat
15	130	25	Meruncing tanggung
16	170	345	Membulat tanggung
17	160	15	Meruncing tanggung
18	130	25	Meruncing tanggung
19	130	0	Meruncing tanggung
20	140	350	Membulat tanggung
21	210	310	Meruncing tanggung
22	130	20	Membulat tanggung
23	200	35	Membulat tanggung
24	280	40	Membulat tanggung
25	230	15	Membulat tanggung
26	250	0	Membulat tanggung
27	167	340	Meruncing
28	140	25	Membulat tanggung

Tabel 5. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Boyong dan Sungai Pelang, Dusun Plumbon (250-270 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	150	15	Meruncing
2	200	30	Meruncing
3	190	345	Membulat tanggung
4	190	340	Meruncing
5	165	15	Membulat tanggung
6	180	340	Meruncing tanggung
7	350	340	Meruncing
8	168	340	Membulat
9	160	340	Membulat
10	160	340	Membulat
11	140	3450	Membulat
12	453	345	Membulat tanggung

Tabel 6. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Sembung-Tempuran, sebelah Utara Dusun Nglengkong (225-300 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	170	350	Meruncing tanggung
2	190	15	Membulat tanggung
3	163	40	Meruncing tanggung
4	240	25	Meruncing tanggung
5	155	25	Membulat tanggung
6	245	50	Meruncing tanggung
7	380	10	Meruncing tanggung
8	270	10	Meruncing tanggung
9	150	12	Membulat tanggung
10	264	15	Membulat tanggung
11	170	25	Meruncing tanggung
12	405	40	Meruncing tanggung
13	160	0	Meruncing tanggung
14	180	20	Membulat tanggung
15	170	20	Meruncing tanggung
16	190	30	Membulat tanggung
17	140	20	Membulat
18	220	5	Membulat
19	310	10	Meruncing tanggung
20	190	30	Meruncing tanggung
21	154	330	Meruncing
22	180	15	Meruncing
23	170	45	Meruncing tanggung
24	200	350	Meruncing
25	175	30	Membulat tanggung
26	270	30	Meruncing
27	200	50	Membulat tanggung
28	190	345	Meruncing tanggung
29	203	20	Meruncing tanggung
30	205	50	Meruncing tanggung

Tabel 7. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Sembung-Tempuran, sebelah utara Dusun Wonoselo (270-300 m dpl) dan Klidon-Mindi (270-300 m dpl)

NO.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	170	0	Meruncing
2	340	70	Membulat tanggung
3	175	350	Membulat tanggung
4	330	20	Meruncing tanggung
5	160	355	Membulat tanggung
6	300	15	Membulat tanggung
7	240	30	Meruncing tanggung
8	226	15	Membulat tanggung
9	200	340	Membulat tanggung
10	170	0	Membulat tanggung
11	320	40	Membulat tanggung
12	170	20	Meruncing tanggung
13	150	30	Meruncing tanggung
14	237	25	Membulat tanggung
15	200	355	Meruncing
16	150	330	Meruncing tanggung
17	240	20	Meruncing tanggung
18	165	40	Meruncing
19	215	35	Membulat tanggung
20	150	15	Membulat tanggung
21	190	36	Meruncing
22	195	39	Membulat tanggung
23	175	37	Meruncing tanggung
24	190	31	Meruncing tanggung
25	280	28	Membulat
26	230	20	Membulat tanggung
27	315	0	Membulat tanggung
28	150	15	Meruncing tanggung
29	170	5	Meruncing tanggung
30	210	25	Membulat tanggung
31	210	25	Membulat tanggung
32	150	15	Membulat tanggung
33	155	0	Meruncing
34	280	5	Membulat tanggung
35	250	50	Meruncing tanggung
36	230	20	Membulat tanggung
37	160	30	Membulat
38	200	25	Membulat tanggung
39	230	35	Meruncing tanggung
40	240	40	Membulat tanggung
41	280	40	Meruncing
42	190	45	Meruncing tanggung
43	330	40	Membulat
44	350	30	Meruncing tanggung
45	160	38	Membulat
46	170	38	Membulat
47	150	39	Meruncing tanggung
48	150	35	Meruncing tanggung
49	260	15	Membulat tanggung
50	195	42	Membulat tanggung
51	170	33	Meruncing
52	250	20	Meruncing
53	190	25	Meruncing tanggung
54	200	5	Meruncing tanggung
55	190	40	Membulat tanggung
56	240	20	Meruncing
57	190	35	Meruncing
58	430	330	Membulat

Tabel 8. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Sembung-Tempuran, sebelah Timur Dusun Ngelo hingga Bandulan (Sungai Tempuran): 175-230 m dpl

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	150	330	Membulat tanggung
2	170	15	Meruncing
3	175	30	Membulat tanggung
4	156	320	Membulat
5	170		Membulat tanggung
6	160		Meruncing tanggung
7	170		Membulat tanggung
8	200		Meruncing tanggung
9	145	325	Membulat tanggung
10	210		Meruncing
11	220		Membulat tanggung
12	170		Meruncing tanggung
13	155		Membulat tanggung
14	170	335	Meruncing tanggung
15	180		Meruncing tanggung
16	330	335	Membulat
17	280		Membulat tanggung
18	190	20	Meruncing
19	150	25	Meruncing
20	200	335	Meruncing tanggung
21	158	40	Membulat
22	120		Meruncing
23	225		Membulat tanggung
24	160		Membulat
25	170		Membulat
26	160		Meruncing tanggung
27	177		Membulat tanggung
28	145	0	Meruncing tanggung
29	180		Membulat tanggung
30	280	15	Membulat tanggung
31	254	350	Membulat tanggung
32	370	345	Meruncing tanggung
33	360	345	Membulat tanggung
34	340	340	Membulat tanggung

Tabel 9. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di sebelah timur Sungai Kuning-Dusun Yapah (225-300 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	273	30	Meruncing tanggung
2	160	10	Meruncing
3	165	25	Membulat tanggung
4	265	15	Meruncing tanggung
5	310	30	Membulat tanggung
6	140	350	Membulat tanggung
7	160	320	Meruncing tanggung
8	145	335	Meruncing tanggung
9	190	310	Meruncing tanggung
10	230	280	Meruncing tanggung
11	160	290	Membulat
12	145	320	Membulat
13	320	300	Meruncing tanggung
14	220	320	Meruncing tanggung
15	180	320	Meruncing tanggung
16	140	320	Meruncing
17	175	340	Membulat tanggung
18	135	320	Meruncing tanggung
19	190	330	Meruncing
20	210	330	Membulat tanggung
21	160	330	Membulat
22	185	320	Meruncing
23	130	310	Membulat
24	175	330	Membulat
25	150	300	Meruncing
26	145	300	Membulat
27	140	305	Membulat
28	160	320	Membulat tanggung
29	140	340	Meruncing tanggung
30	200	0	Meruncing tanggung

Tabel 10. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Opak dan Sungai Tepus, Dusun Geblok-Cangkringan (500-550 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	290	300	Meruncing tanggung
2	160	280	Meruncing tanggung
3	160	30	Membulat
4	174	330	Meruncing
5	217	25	Meruncing
6	150	35	Meruncing
7	210	35	Meruncing tanggung
8	200	310	Membulat tanggung
9	230	45	Membulat tanggung
10	150	45	Membulat tanggung
11	280	30	Membulat
12	150	340	Membulat tanggung
13	150	340	Meruncing
14	250	40	Meruncing tanggung
15	150	50	Membulat
16	175	50	Meruncing tanggung
17	167	20	Meruncing tanggung
18	170	45	Membulat
19	250	340	Membulat tanggung
20	150	50	Meruncing tanggung
21	160	20	Membulat
22	218	320	Meruncing
23	207	30	Membulat tanggung
24	310	0	Meruncing
25	165	50	Membulat tanggung
26	190	30	Membulat tanggung
27	170	30	Meruncing
28	200	45	Membulat tanggung
29	190	50	Meruncing
30	206	300	Membulat tanggung
31	280	280	Membulat tanggung
32	160	10	Membulat
33	460	55	Meruncing
34	270	290	Membulat tanggung
35	160	300	Meruncing tanggung
36	190	290	Membulat tanggung
37	175	50	Meruncing
38	176	30	Membulat tanggung
39	150	40	Membulat tanggung
40	160	40	Membulat tanggung
41	170	70	Membulat
42	400	50	Meruncing tanggung
43	230	25	Meruncing
44	200	30	Meruncing tanggung
45	150	40	Membulat tanggung
46	200	30	Membulat tanggung
47	170	30	Membulat
48	240	40	Membulat tanggung
49	210	0	Meruncing tanggung
50	150	45	Membulat
51	170	50	Meruncing
52	167	0	Membulat tanggung
53	180	15	Meruncing
54	166	20	Meruncing tanggung
55	160	25	Meruncing
56	240	20	Membulat tanggung
57	170	330	Membulat
58	220	-	Membulat tanggung
59	250	20	Meruncing
60	300	20	Meruncing
61	310	60	Meruncing
62	170	40	Membulat tanggung
63	240	60	Meruncing
64	205	65	Membulat tanggung
65	150	60	Membulat
66	170	65	Meruncing
67	150	70	Meruncing tanggung
68	190	45	Meruncing tanggung
69	180	40	Membulat tanggung
70	240	40	Meruncing tanggung
71	230	50	Meruncing
72	240	40	Meruncing
73	220	30	Meruncing tanggung
74	230	40	Meruncing
75	180	35	Meruncing
76	160	20	Meruncing tanggung

Tabel 11. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Opak dan Sungai Tepus, Dusun Koroulon-Klabasan (350-375 m dpl)

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	150	300	Meruncing tanggung
2	205	295	Meruncing tanggung
3	180	340	Meruncing tanggung
4	160	330	Meruncing tanggung
5	152	310	Membulat tanggung
6	145	290	Membulat tanggung
7	160	5	Membulat
8	170	330	Membulat tanggung
9	185	290	Meruncing tanggung
10	200	300	Membulat tanggung
11	160	340	Membulat tanggung
12	260	5	Meruncing tanggung
13	160	20	Membulat tanggung
14	170	355	Meruncing
15	194	300	Membulat tanggung
16	180	330	Meruncing tanggung
17	150	310	Meruncing tanggung
18	150	100	Membulat tanggung
19	160	30	Membulat tanggung
20	230	335	Meruncing tanggung
21	170	310	Meruncing
22	200	330	Meruncing tanggung
23	170	290	Meruncing tanggung
24	280	355	Meruncing tanggung
25	180	300	Membulat tanggung
26	245	330	Meruncing tanggung
27	150	285	Meruncing tanggung
28	160	340	Membulat tanggung
29	140	290	Membulat
30	184	300	Membulat
31	180	300	Membulat
32	190	340	Meruncing tanggung
33	190	340	Membulat tanggung
34	180	300	Meruncing tanggung
35	158	300	Membulat tanggung
36	160	5	Meruncing
37	150	350	Meruncing
38	180	350	Meruncing
39	200	310	Meruncing tanggung
40	197	300	Membulat tanggung
41	180	280	Membulat tanggung
42	190	280	Membulat
43	300	280	Membulat
44	176	50	Meruncing
45	160	5	Meruncing
46	183	330	Membulat

tumpang-tindih” (Gambar 4). Pada kondisi yang demikian, bagian depan fragmen memperlihatkan morfologi berbentuk prisma segi tiga tak simetris, sedangkan beberapa fragmen yang lain memperlihatkan geometri yang simetri. Ujung belakang fragmen lebih rendah dari ujung depannya, bahkan ujung belakang kebanyakan fragmen sama tingginya dengan permukaan tanah. Arah sumbu panjang tegak lurus dengan arah penyirapan fragmen. Bagian yang menumpang adalah arah depan arah aliran tersebut.

Hasil pengukuran diameter dan arah penyirapan fragmen bongkah memperlihatkan pengelompokan distribusi fragmen bongkah berada pada ketinggian antara 200-300 m dpl, sedangkan di sekitar Sungai Gendol dan Sungai Opak dapat menjangkau hingga ketinggian 130 m dpl. Dari hasil analisis besar butir di studio berhasil diketahui bahwa faktor fluida (air) memegang peranan penting dalam pemilahan lahar, walaupun lahar tersebut diendapkan pada

Tabel 12. Hasil Pengukuran Fragmen Bongkah Lahar di antara Sungai Opak dan Sungai Tepus, Dusun Karanganyar-Cokrosari (225-300 m dpl); Penyirapan diukur pada arah Punggung Katak

No.	Ø (cm)	Arah penyirapan U ... °T	Bentuk butir
1	180	30	Meruncing tanggung
2	272	20	Membulat tanggung
3	240	300	Meruncing
4	420	300	Membulat tanggung
5	180	350	Meruncing tanggung
6	280	300	Membulat
7	360	215	Membulat tanggung
8	370	243	Membulat tanggung
9	170	215	Meruncing tanggung
10	185	215	Meruncing tanggung
11	190	200	Meruncing tanggung
12	235	135	Meruncing tanggung
13	200	160	Meruncing tanggung
14	420	200	Membulat tanggung
15	160	210	Meruncing tanggung
16	235	135	Membulat tanggung
17	153	230	Meruncing tanggung
18	190	215	Meruncing tanggung
19	195	220	Membulat tanggung
20	187	215	Meruncing tanggung
21	177	180	Meruncing tanggung
22	200	230	membulat tanggung
23	210	250	Membulat tanggung
24	180	270	Membulat tanggung
25	155	260	Meruncing
26	375	150	Meruncing tanggung
27	160	220	Meruncing tanggung
28	240	260	Meruncing tanggung
29	160	210	Meruncing
30	170	230	Meruncing tanggung
31	380	245	Membulat tanggung
32	170	210	Meruncing tanggung
33	225	220	Meruncing tanggung
34	280	230	Meruncing tanggung
35	160	230	Meruncing tanggung
36	160	220	Meruncing tanggung
37	160	170	Meruncing tanggung
38	190	45	Meruncing tanggung
39	245	55	Membulat tanggung
40	160	300	Meruncing
41	360	310	Meruncing tanggung
42	250	310	Meruncing
43	230	45	Membulat tanggung
44	220	225	Meruncing tanggung
45	295	230	Meruncing tanggung
46	275	260	Meruncing tanggung
47	235	250	membulat tanggung
48	190	215	Membulat tanggung
49	280	190	membulat tanggung
50	210	165	Meruncing tanggung
51	178	135	Meruncing tanggung
52	153	110	Meruncing tanggung
53	190	120	Meruncing tanggung
54	280	165	Meruncing tanggung
55	190	210	Membulat tanggung
56	158	125	Meruncing tanggung
57	240	210	Meruncing tanggung
58	156	230	Meruncing tanggung
59	190	180	Meruncing tanggung
60	170	125	Meruncing
61	168	145	Meruncing tanggung
62	260	140	Meruncing tanggung
63	240	150	Membulat tanggung
64	325	215	Membulat tanggung
65	335	215	Membulat tanggung
66	155	155	Membulat tanggung
67	265	160	Meruncing tanggung
68	180	155	Meruncing
69	190	210	Meruncing tanggung
70	235	155	Membulat tanggung
71	245	240	Meruncing tanggung
72	213	145	Meruncing tanggung
73	250	130	Meruncing tanggung
74	215	150	Membulat tanggung

mekanisme rombakan. Grafik distribusi besar butir fragmen bongkah lahar (Gambar 5-6) memperlihatkan pemilahan sedang hingga baik dengan sebaran butiran secara gradual.

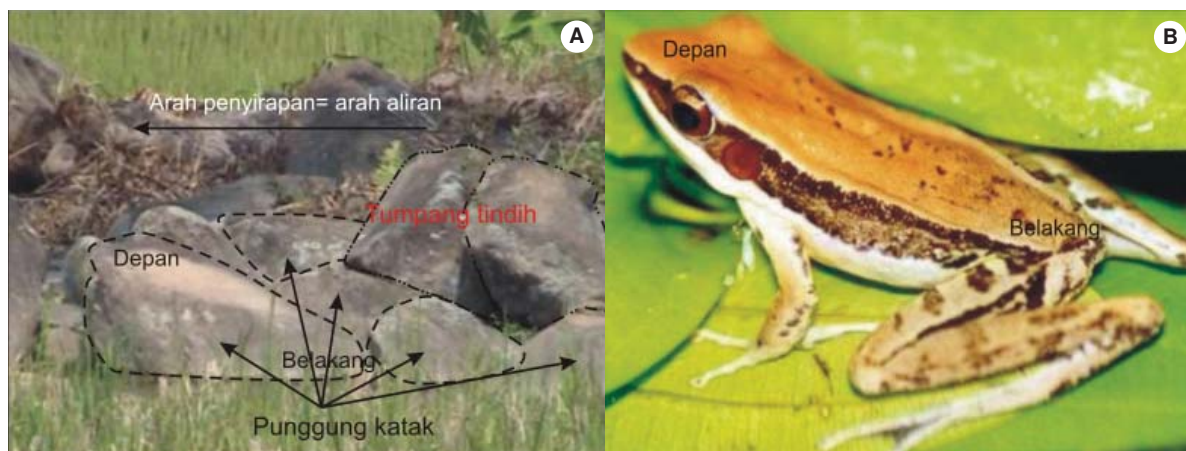
Arah penyirapan diinterpretasikan sebagai fase akhir arah aliran saat material mengendap. Gambar 7 adalah sebaran arah penyirapan fragmen bongkah lahar yang tersingkap di daerah penelitian: beberapa diagram *rose* menunjukkan sebaran dan arah penyirapan yang tidak sama. Pada kebanyakan lokasi, bukaan kipas dalam diagram *rose* adalah searah (terkumpul) dan pada beberapa lokasi yang lain kipas terbuka. Sebagai contoh adalah lahar pada ketinggian di atas 300 m dpl di antara Sungai Winongo dan Sungai Boyong, arah aliran terfokus pada satu arah, pada ketinggian antara 250-300 m dpl arah aliran menyebar, dan pada ketinggian di bawah 250 arah aliran lebih terfokus lagi. Distribusi diameter fragmen yang berukuran lebih besar (200-400 cm) lebih banyak dijumpai di sepanjang Sungai Gendol-Opak dan Winongo-Boyong.

DISKUSI

Lahar permukaan di daerah penelitian dihasilkan dari bahan rombakan material gunung api berdensitas tinggi. Mekanisme transportasi dan pengendapan material tersebut dikategorikan berkecepatan tinggi, dengan daya alir dihasilkan dari dominasi interaksi antar partikel (granular). Pengendapan terjadi saat energi (*stress*) aliran masing-masing butir (granular) telah habis. Hal itu terjadi ketika sifat plastis aliran, yang membentuk aliran turbulen, telah berubah menjadi bersifat suspensi. Pada bagian aliran utama, mekanisme aliran masih berlangsung secara turbulen, dengan proses pengendapan yang dipengaruhi oleh tegangan-regangan kandungan lumpur membentuk pergerakan massa kohesif. Saat terjadi pengendapan, massa masih bersifat plastis sehingga tidak sempat terpilah. Makin ke atas, resistensi aliran makin berkurang dan pergerakannya makin tak kohesif, sehingga pemilahannya menjadi lebih baik. Pemilahan yang lebih baik tersebut ditunjukkan oleh adanya penyirapan fragmen yang memperlihatkan penampakan seperti “punggung katak”. Dengan demikian maka mekanisme aliran massa tersebut diinterpretasikan terjadi pada konsentrasi partikel sekitar 60%. Pada konsentrasi yang demikian,

Tabel 13. Rangkuman Hasil Pengukuran Besar Butir Fragmen Bongkah Lahar, Material yang diendapkan pada tahun ~1969 di daerah Penelitian. α : arah dari Gunung Api Merapi, \varnothing_{\max} : diameter maksimal, $\varnothing_{\text{rata-rata}}$: diameter rata-rata, SR: agak membulat, R: membulat, SA: agak meruncing dan A: meruncing

Lokasi: antara Sungai ... dan Sungai ...	α (U..°T)	Gradien lereng	Ketinggian (m dpl)	Pengukuran di:	\varnothing_{\max}	$\varnothing_{\text{rata-rata}}$	Bentuk butir	Arah penyirapan (U..°T)
Winongo dan Bedog	40-45	0,15	276-295	Plosorejo	425	150-200	SR-SA	210-220
		0,1	250-256	Wonosobo	413	150-200	A-R	160-170
		0,065	182-225	Selorejo	310	130-170	SA-SR	215-225
Boyong dan Winongo	15-20	0,1	323-353	Rejodani	430	175-180	R-SR	140-150
		0,09	173-218	Plumbon	340	150-170	SA-SR	180-185
		0,08	168-192	Mudal	325	95-115	R-SA	205-215
Pelang dan Boyong	10-15	0,16	265-276	Klabasan	453	160-170	A-SA	160-165
		0,1	193-140	Ngebel gede	380	135-145	SA-SR	205-210
		0,085	163-190	Ngasem	280	125-130	A-SR	160-170
Sembung dan Tempuran	5-10	0,14	224-230	Klidon	430	170-180	SA-SR	225-230
		0,12	192-217	Nglengkong	405	145-160	SA-SR	210-220
		0,065	142-169	Ngebo	315	135-145	SA-SR	210-215
Tempuran dan Blotan	0-5	0,14	222-226	Mindi	370	150-170	SR-R	165-170
		0,12	190-215	Gembutri	260	130-145	SA-SR	210-215
		0,065	142-170	Bandulan	200	100-120	SR-R	140-150
Kuning dan Cupuwetan	355-0	0,16	227-254	Yapah	320	130-140	SA-SR	195-200
		0,13	197-223	Sawahan	310	130-140	SA-SR	130-140
		0,07	145-174	Sambiroto	273	120-125	SR-R	100-120
Tepus dan Opak	350-355	0,18	466-476	Tegalsari	460	140-160	A-SR	225-230
		0,16	286-291	Koroulon	400	130-140	SA-SR	120-130
		0,065	200-225	Cokrosari	420	150-170	SA	145-150
		0,062	130-154	Pete	420	130-145	A-SA	120-130



Gambar 2. A. Morfologi Pungguk Katak dan Susunan tumpang-tindih Fragmen Bongkah pada bagian atas Endapan Lahar di Cangkringan, kurang lebih 14 km dari puncak Gunung Api Merapi (foto: Agustus 2004) dan B. Model Katak Air (foto: mongabay.com).



Gambar 3. Fragmen bongkah lahar di Tegalsari (Cangkringan). Anak panah adalah arah penyirapan; a. Penampakan dari samping punggung kura-kura pada fragmen bongkah berukuran 427 cm, dan b. Penampakan berbentuk segitiga pada fragmen bongkah berukuran 400 cm. Penampakan dari depan (foto: Agustus 2004).

lahar tersebut kekentalannya sangat tinggi karena kandungan lumpurnya masih sangat tinggi. Itulah sebabnya aliran lahar tersebut bersifat plastis.

Interpretasi dinamika pengendapan adalah lahar dengan fragmen bongkah yang menyirap, sebagaimana yang dibahas dalam penelitian ini, dan terbentuk pada zona batas antara aliran utama dan aliran bagian atas. Pada zona batas tersebut berlangsung aliran transisi antara mekanisme turbulen dan laminar yang dibentuk oleh larutan suspensi. Saat material mendekati fase akhir diendapkan, mekanisme pengendapan didominasi oleh aliran laminar yang lebih menyerupai proses fluvial. Pada periode tersebut tubuh aliran tersusun secara tak kohesif, membentuk aliran laminar yang mekanisme pergerakannya dibentuk oleh interaksi inersia (frikisional) fragmen-fragmen berukuran besar. Saat sedimen telah mencapai zona pengendapan akhir, aliran massa dikontrol oleh konsentrasi fluida (air) yang tinggi. Partikel yang lebih kecil (berukuran pasir - kerikil) tererosi dan ikut tertransportasi bersama-sama dengan fluida tersebut, sehingga terbentuk rongga antar fragmen. Oleh gaya gravitasi bumi, fragmen-fragmen berukuran besar tersebut mengalami *setling* dengan posisi: bagian yang lebih berat berada di depan dengan posisi lebih rendah, sedangkan bagian yang lebih ringan terangkat atau tetap pada posisinya (Gambar 8).

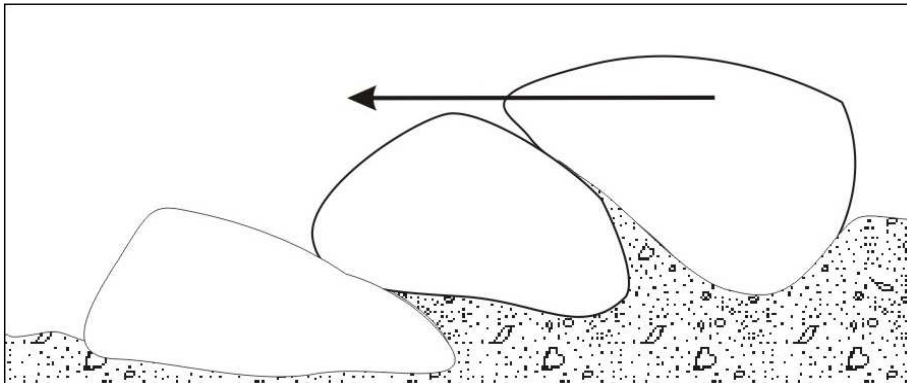
Hasil pengukuran arah penyirapan fragmen di daerah penelitian dapat membuktikan bahwa arah

sumbu panjang tidak selamanya menunjukkan arah aliran purba, dan tidak seluruh fragmen dikenali arah sumbu panjangnya. Untuk itulah maka dalam penelitian ini digunakan pendekatan arah penyirapan. Jadi, arah penyirapan dapat ditunjukkan oleh:

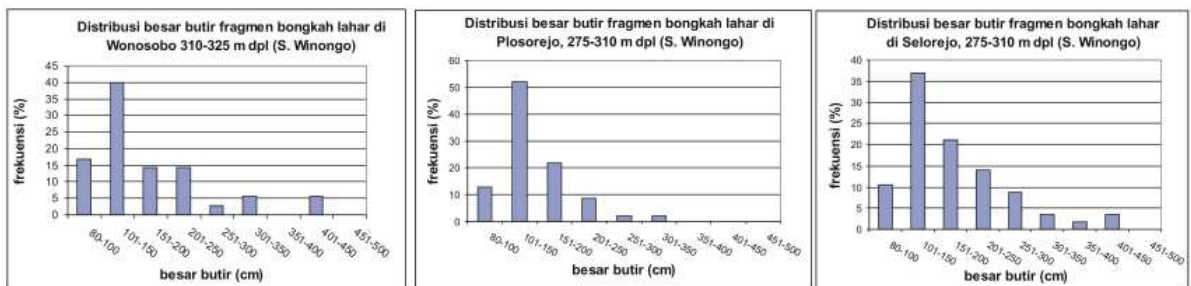
1. Geometri “punggung katak” (gajah): bagian depan adalah yang lebih tinggi, dan merupakan arah depan aliran (Gambar 2)
2. Morfologi “punggung kura-kura”: karena pemukaannya datar maka bagian depan adalah yang lebih lebar, sebagai petunjuk arah aliran (Gambar 3)
3. Posisi tumpang-tindih (*superimpose*): bagian yang menumpang adalah yang di depan, berarti arah aliran ditunjukkan oleh posisi sejajar arah tumpang-tindih (Gambar 4).

Dampak aliran lahar tersebut terhadap perubahan geomorfologi di daerah penelitian belum dapat dianalisis lebih jauh. Namun dengan menggunakan asumsi bahwa lahar selalu mengalir menurun lereng pada morfologi yang lebih rendah, maka dapat diinterpretasikan bahwa pengendapannya telah mempengaruhi paleogeomorfologinya. Hal itu ditunjukkan oleh kondisi morfologi endapan-endapan tersebut yang telah berubah menjadi lahan pertanian dan pemukiman. Kondisi demikian tentunya terbentuk karena proses peninggian, oleh proses pengendapan sambil mengerosi daerah di sekitarnya, sehingga lembah sungai bergeser ke posisinya sekarang.

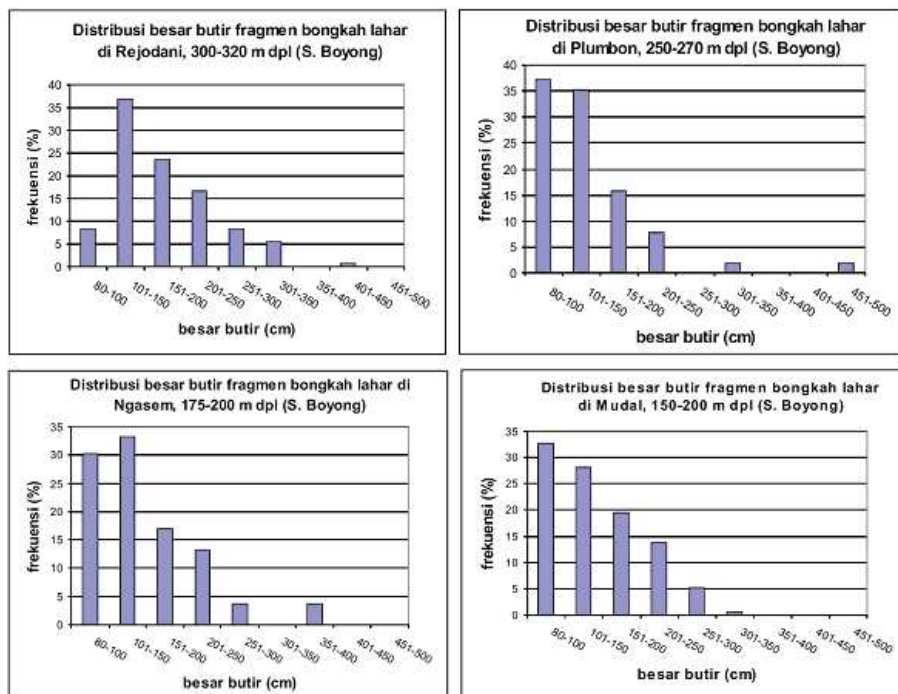
Diameter butir material gunung api yang menyu-



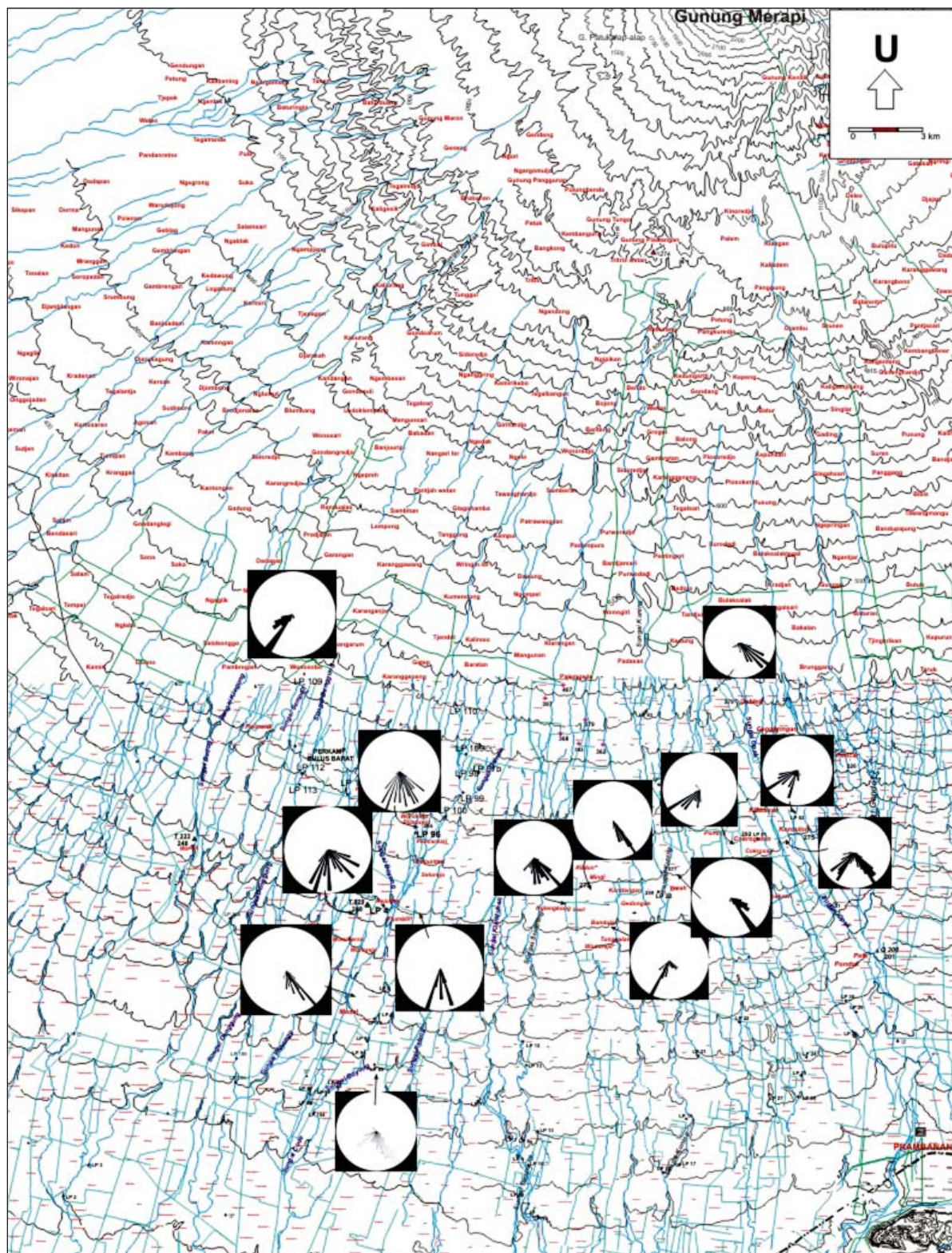
Gambar 4. Sketsa penampakan tumpang tindih fragmen lahar di Cangkringan.



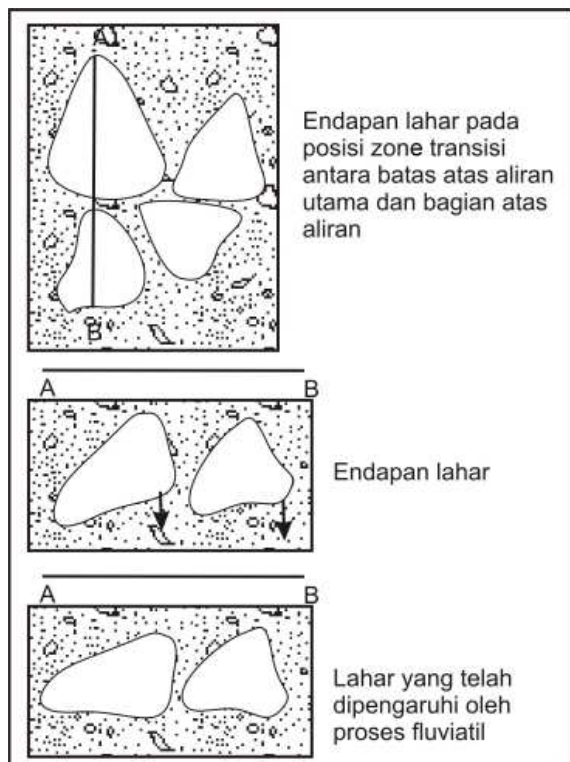
Gambar 5. Grafik frekuensi sebaran fragmen bongkah lahar bagian atas di sekitar Sungai Winongo



Gambar 6. Grafik frekuensi sebaran fragmen bongkah lahar bagian atas di sekitar Sungai Boyong.



Gambar 7. Hasil pengukuran arah penyirapan fragmen bongkah lahar di daerah penelitian (diagram rose arah aliran menggunakan program *Stereostat*®). Sungai-sungai (warna biru tebal).



Gambar 8. Proses *setling* fragmen lahar berukuran bongkah oleh pengaruh fluvial setelah proses pengendapan

sun lahar di daerah penelitian sebenarnya bervariasi dari lempung hingga bongkah. Besarnya konsentrasi fragmen bongkah mendominasi dalam membangun kekentalan massa, densitas, dan tegangan-regangan aliran. Sifat masing-masing partikel, yaitu matriks dan fragmen dalam posisinya sebagai komponen granular, hanya berpengaruh secara individual. Sebagai contoh: fragmen dengan diameter kurang dari 50 cm yang terletak di antara fragmen besar berdiameter lebih 150 cm tidak (jarang) menunjukkan arah penyirapan yang sama dengan fragmen berdiameter lebih dari 150 cm tersebut. Penyirapan fragmen kecil adalah arah distribusi dari hasil fragmentasi bongkah yang lebih besar ketika transportasi berlangsung, jadi hanya bersifat lokal.

Sebaran dan pola arah penyirapan dapat digunakan untuk menginterpretasikan paleogeomorfologi dalam suatu daerah saat fase akhir pengendapan lahar. Sebaran fragmen bongkah lahar yang memiliki arah penyirapan bervariasi (kipas diagram *rose* membuka lebar; Gambar 7) diendapkan dalam arus yang lebih lambat dengan morfologi yang landai. Sebaliknya jika penyirapan fragmen lahar searah

(kipas diagram *rose* menutup; Gambar 7), maka lahar tersebut diendapkan dalam arus yang lebih cepat dengan morfologi yang lebih curam. Karena heterogenitas arah penyirapan di daerah penelitian tidak dikontrol oleh jarak lokasi terhadap puncak Gunung Api Merapi, maka sebaran heterogenitas masing-masing arah penyirapan tersebut merupakan variasi paleogeomorfologi secara lokal. Sebagai contoh adalah arah penyirapan lahar pada ketinggian kurang dari 250 m dpl di sekitar Sungai Winongo-Boyong yang justru diinterpretasikan lebih curam daripada wilayah dengan ketinggian antara 250-300 m dpl (Gambar 7).

KESIMPULAN

Dinamika pengendapan material rombakan gunung api atau yang lebih dikenal dengan lahar dapat dipelajari dari sifat penyirapan fragmen bongkah yang terkandung di dalamnya. Arah penyirapan fragmen bongkah tersebut diidentifikasi dari permukaan sedimen, dengan melihat geometrinya yang menyerupai bentuk “punggung katak” dan “punggung kura-kura”, serta bersusunan “tumpang-tindih”. Arah penyirapan tersebut juga dapat digunakan untuk melacak sumber material (sedimen), terutama bagi material yang telah tidak diketahui lagi sumbernya dan interpretasi paleogeomorfologi secara lokal wilayah sedimentasi tersebut. Model penyirapan yang menyerupai bentuk “punggung katak” berlaku untuk endapan dengan diameter fragmen sekitar 90-200 cm, bentuk “punggung kura-kura” berkembang dengan baik pada endapan dengan diameter fragmen sekitar 205-400 cm, dan susunan “tumpang-tindih” berkembang baik pada bagian aliran utama yang belum dipengaruhi oleh mekanisme fluvial. Karena lahar merupakan material yang pengendapannya di darat, maka diperlukan studi lebih lanjut pada sedimen yang pengendapannya di laut atau lakustrin, untuk mengetahui aplikasinya lebih jauh.

Tidak semua analisis sedimentologi yang menggunakan pendekatan determinasi ukuran butir pada material fraksi pasir-lempung dengan pengayaan (basah ataupun kering), dapat diberlakukan pada semua jenis material. Dinamika pengendapan mungkin dapat dideterminasi, namun penentuan sumber dan arah pengendapan tidak dapat dimodelkan, karena penyirapan fragmen berukuran kecil (kurang

dari 50 cm) merupakan arah distribusi hasil fragmentasi fragmen yang lebih besar saat transportasi berlangsung.

ACUAN

- Costa, J.E., 1984. Physical geomorphology of debris flow. In Costa, J.E. & Fleischer, P.J, eds., *Developments and applications of geomorphology*, Berlin, Springer-Verlag, 268-317.
- Fisher, R.V., 1971. Features of coarse-grained, high-concentration fluids and their deposits. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41, h. 916-927.
- Fisher, R.V., 1983. Flow transformations in sediment gravity flows. *Geology* 11, h. 273-274.
- Fisher, R.V., 1984. Submarine volcanoclastic rocks. In Kokelaar, B.P. and Howells, M.F. (eds). *Marginal basin geology: volcanic and associated sedimentary and tectonic processes in modern and ancient marginal basins*. Special Publication, *Geological Society of London*, 16, h. 5-27.
- Fisher, R.V. dan Schmincke, H.U., 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer-Verlag, Berlin, 472 h.
- Lowe, D.R., 1982. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52, h. 279-297.
- Pierson, T.C. dan Scott, K.M., 1985. Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research* 21, h. 1511-1524.
- Scott, K.M., 1988. Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz system. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1447-A, h. 1-74.